

## 基于包层泵浦的 4 模掺铒光纤放大器的增益均衡

阮江冉<sup>1,2</sup>, 裴丽<sup>1,2\*</sup>, 郑晶晶<sup>1,2</sup>, 王建帅<sup>1,2</sup>, 徐文轩<sup>1,2</sup>, 李晶<sup>1,2</sup>, 宁提纲<sup>1,2</sup><sup>1</sup>北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;<sup>2</sup>北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

**摘要** 少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)是长距离模分复用(MDM)光纤通信系统中必不可少的中继器件,其模间增益差(DMG)直接影响系统的通信质量。为实现 FM-EDFA 中不同模式的增益均衡,在包层泵浦条件下,提出了一种支持 4 模式组的铒离子分层掺杂环芯光纤,且无需考虑泵浦模式。对环芯光纤进行了设计,通过控制纤芯中心凹陷和外部凹槽折射率引起的模式分布变化,结合合理设计的铒离子掺杂半径及浓度来减小 DMG。结果表明,当铒离子在环芯内分双层掺杂时,最大 DMG 从 0.8 dB(单层均匀掺杂)降低至 0.44 dB(环芯双层)。在全 C 波段(1530~1565 nm)中,4 模式组增益超过 22 dB,最大 DMG 低于 0.45 dB,噪声系数小于 5.3 dB。包层泵浦结构有利于实现 FM-EDFA 的全光纤连接,易于与 MDM 通信系统集成,并发挥掺铒光纤放大器的全光补偿优势。

**关键词** 光通信; 光纤通信; 少模掺铒光纤放大器; 环芯光纤; 增益均衡; 包层泵浦

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0406001

## Gain Equalization of 4-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Cladding Pump

Ruan Jiangran<sup>1,2</sup>, Pei Li<sup>1,2\*</sup>, Zheng Jingjing<sup>1,2</sup>, Wang Jianshuai<sup>1,2</sup>, Xu Wenxuan<sup>1,2</sup>,  
Li Jing<sup>1,2</sup>, Ning Tigang<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;<sup>2</sup>Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** Few-mode erbium-doped fiber amplifier (FM-EDFA) is a necessary repeater for long-haul mode division multiplexing (MDM) optical fiber communication systems, and its differential modal gain (DMG) directly affects the communication quality of the systems. In order to realize the gain equalization of different modes in FM-EDFA, a layered erbium ion doped ring core fiber supporting 4-mode group in cladding-pumped condition is proposed, and the pump mode is not considered. The ring core fiber is designed, and the DMG is reduced by controlling the change of the mode distribution induced by the central recess and outer groove refractive index of the core, combining with the well-designed doping radius and concentration of erbium ion. The results show that when erbium ions are doped in double layers in the ring core, the maximum DMG is reduced from 0.8 dB (single layer and uniform doping) to 0.44 dB (double layers in the ring core). In the full C band (1530–1565 nm), the gain of the 4-mode group is higher than 22 dB, the maximum DMG is less than 0.45 dB, and the noise figure is less than 5.3 dB. The cladding pump structure is conducive to the realization of all-fiber connection of FM-EDFA, is easy to integrate with MDM communication system, and gives full play to the all-optical compensation advantages of erbium-doped fiber amplifiers.

**Key words** optical communications; fiber optics communications; few-mode erbium-doped fiber amplifier; ring core fiber; gain equalization; cladding pump

收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-07-25; 录用日期: 2021-08-20

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB1801003)

通信作者: \*lpei@bjtu.edu.cn

## 1 引言

随着互联网时代的发展,数据业务在爆炸式增长。受到光纤非线性效应导致的入纤功率的限制,基于传统单模光纤的通信系统的传输容量日益趋近香农极限(100 Tbit/s)<sup>[1-2]</sup>。为了解决这一容量限制,在单模光纤的其他维度(如波长、偏振、相位和幅度)已被充分利用的基础上,空分复用(SDM)技术在高速大容量光纤通信系统中得到了广泛关注并迅速发展<sup>[3-4]</sup>。SDM 技术通过多芯光纤(MCF)<sup>[5]</sup>、少模光纤(FMF)<sup>[6-7]</sup>或少模多芯光纤(FM-MCF)<sup>[8-10]</sup>实现多个信道的同时传输,其传输容量增长了数倍<sup>[11]</sup>。将基于 FMF 的模分复用(MDM)系统的不同模式作为独立的空间信道进行数据传输。到目前为止,基于 2 模<sup>[12]</sup>、3 模<sup>[13]</sup>、4 模<sup>[14]</sup>和 6 模<sup>[15]</sup>的少模光纤和传输距离超过 50 km 的传输速率为  $88 \times 3 \times 112$  Gbit/s 的 3 模光传输系统已经实现<sup>[16]</sup>。为了实现 MDM 系统的长距离传输以及光通信系统的高度集成,设计性能优越的少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)对多个模式进行同时放大具有重要的意义。然而,在 FM-EDFA 中,信号不同模式与泵浦光、铒离子掺杂分布的重叠积分差异造成的模间增益差(DMG)会直接影响整个 MDM 系统的鲁棒性能<sup>[17]</sup>。因此,实现低 DMG 是 FM-EDFA 研究的重大挑战。

目前降低 DMG 的方式主要有控制泵浦模式选择和优化掺铒光纤的结构参数<sup>[18]</sup>。2011 年,Yung 等<sup>[19]</sup>系统研究了双模掺铒光纤放大器,在纤芯泵浦条件下通过优化光纤铒离子分布和泵浦模式实现了 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模大于 22 dB 的模式增益。同年,Bai 等<sup>[20]</sup>对可重构的多泵浦模式实现双模放大器(LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub>)增益均衡进行了系统的理论研究,并于 2012 年对高阶模泵浦实现模式增益均衡进行了实验验证,将 DMG 从 3 dB 降低至 1.2 dB<sup>[21]</sup>。然而,随着 FM-EDFA 模式数的不断扩展,单独调整

模式配比已无法进一步满足系统的增益均衡要求。因此,Gaur 等<sup>[22]</sup>通过将沟槽辅助的环形掺杂光纤作为增益介质实现了 5 模式组(LP<sub>01</sub>,LP<sub>11</sub>,LP<sub>21</sub>,LP<sub>31</sub>,LP<sub>41</sub>)的增益均衡,在 1530 nm 信号波长处得到超 20 dB 的增益及 0.45 dB 的 DMG。2014 年,Kang 等<sup>[23]</sup>利用遗传算法优化铒离子分层掺杂实现了全 C 波段 DMG 小于 1 dB 的 4 模和 6 模 EDFA。2021 年,王文笙等<sup>[24]</sup>通过优化泵浦模式组合及光纤掺杂结构,提高了 4 模式群组与 5 模式群组在 C 波段的增益性能。单模泵浦二极管已无法满足提高的泵浦功率要求和系统稳定性要求,而包层泵浦作为一种有效的泵浦方式,将大幅降低系统成本和复杂度。高功率的多模泵浦二极管已经实现商用,包层泵浦的 4 模和 6 模 EDFA 性能已经得到了实验验证<sup>[25-26]</sup>。综上,不断优化掺杂光纤的铒离子分布以进一步降低包层泵浦 FM-EDFA 的 DMG 对 MDM 系统具有重要意义。

本文研究了支持 4 模式组的包层泵浦掺铒光纤放大器的性能,采用铒离子分层掺杂环芯光纤实现了 LP<sub>01</sub>,LP<sub>11</sub>,LP<sub>21</sub> 和 LP<sub>31</sub> 模式的增益均衡。在掺铒光纤中,铒离子呈环形双层掺杂分布,这有效降低了 FM-EDFA 的 DMG。当信号每模式输入功率为 -10 dBm 时,实现了全 C 波段超过 22 dB 的平坦增益和低于 0.45 dB 的 DMG。在此基础上,本文对设计的 FM-EDFA 的制造容差进行了分析,进而对放大性能的可靠性进行了研究。

## 2 少模掺铒光纤放大器理论模型

与单模掺铒光纤放大器不同,FM-EDFA 的信号各模式模场分布不同且相对独立。在 FM-EDFA 的理论模型中<sup>[27-28]</sup>,假设铒离子在光纤中均匀分布且采用光纤弱导近似,利用二能级系统来描述铒离子的能级结构,结合受激吸收、受激辐射和自发辐射等效应并利用稳态近似可得到粒子数方程和功率传播方程。当光纤上下能级达到稳态时,粒子数方程为

$$N_2(r, \varphi, z) = \frac{\frac{1}{h\nu_s} \sum_{j=1}^{m_s} (P_{s,j} + P_{ASE,j}) \sigma_{as,j} i_{s,j}(r, \varphi) + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{k=1}^{m_p} P_{p,k} \sigma_{ap,k} i_{p,k}(r, \varphi)}{\frac{1}{\tau} + \frac{1}{h\nu_s} \sum_{j=1}^{m_s} (P_{s,j} + P_{ASE,j}) (\sigma_{as,j} + \sigma_{es,j}) i_{s,j}(r, \varphi) + \frac{1}{h\nu_p} \sum_{k=1}^{m_p} P_{p,k} \sigma_{ap,k} i_{p,k}(r, \varphi)} N_0(r, \varphi, z), \quad (1)$$

$$N_1(r, \varphi, z) = N_0(r, \varphi, z) - N_2(r, \varphi, z), \quad (2) \quad \text{式中: } r \text{ 为柱坐标系下光纤径向距离; } \varphi \text{ 为光纤方位}$$

角;  $z$  为光纤轴向距离;  $\tau$  为上能级弛豫时间;  $h$  是普朗克常量;  $\nu_s$  和  $\nu_p$  为信号光和泵浦光频率;  $m_s$  和  $m_p$  为信号光和泵浦光总模式数;  $P_{s,j}$  和  $P_{p,k}$  为第  $j$  个信号模式和第  $k$  个泵浦模式的功率;  $P_{ASE,j}$  为第  $j$  个信号模式的自发辐射噪声 (ASE) 功率;  $i_{s,j}(r, \varphi)$  和  $i_{p,k}(r, \varphi)$  分别为信号光和泵浦光的归一化光强分布;  $\sigma_{as,j}$  和  $\sigma_{ap,k}$  为第  $j$  个信号模式和第  $k$  个

泵浦模式的吸收截面系数;  $\sigma_{es,j}$  为第  $j$  个信号模式的发射截面系数;  $N_0(r, \varphi, z)$  为光纤中总铒离子浓度分布;  $N_2(r, \varphi, z)$  为光纤中上能级铒离子浓度分布;  $N_1(r, \varphi, z)$  为光纤中下能级铒离子浓度分布。

信号光、前向泵浦光和前后向 ASE 沿着光纤长度演化的过程可由功率传播方程表示, 相应表达式为

$$\frac{dP_{s,j}}{dz} = P_{s,j} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,j}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z)\sigma_{es,j} - N_1(r, \varphi, z)\sigma_{as,j}] r dr d\varphi, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{p,k}}{dz} = -P_{p,k} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{p,k}(r, \varphi) N_1(r, \varphi, z)\sigma_{ap,k} r dr d\varphi, \quad (4)$$

$$\pm \frac{dP_{ASE,j}}{dz} = P_{ASE,j} \int_0^{2\pi} \int_0^a i_{s,j}(r, \varphi) [N_2(r, \varphi, z)\sigma_{es,j} - N_1(r, \varphi, z)\sigma_{as,j}] r dr d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_0^a 2h\nu_s\sigma_{es,j}\Delta\nu i_{s,j}(r, \varphi) N_2(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \quad (5)$$

式中:  $a$  表示光纤纤芯半径;  $\Delta\nu$  表示噪声带宽间隔。

由于采用的是包层泵浦, 泵浦光可沿着整个光纤均匀分布在光纤截面上并且与信号光各模式同向传播, 故可以通过纤芯与光纤截面面积比值来分析泵浦光在掺铒光纤中的能量分布, 这在一定程度上简化了理论模型的求解方法。同时, 在 ASE 计算过程中采用的是等效噪声带宽模型, 将 C 波段等间隔划分, 带宽间隔为  $\Delta\nu = 2 \text{ nm}^{[23]}$ , 故在每个间隔内不同模式具有相同的信号中心波长。信号光第  $j$  个模式或泵浦光第  $k$  个模式在光纤上的归一化光强分布可表示为

$$i_j(r, \varphi) = \frac{I_j(r, \varphi, z)}{\int_0^{2\pi} \int_0^a I_j(r, \varphi, z) r dr d\varphi}, \quad (6)$$

$$i_k(r, \varphi) = \frac{I_k(r, \varphi, z)}{\int_0^{2\pi} \int_0^a I_k(r, \varphi, z) r dr d\varphi}, \quad (7)$$

式中:  $I_j(r, \varphi, z)$  和  $I_k(r, \varphi, z)$  为模式光强。由 (6)、(7) 式可知, 归一化光强仅与不同模式的空间分布有关。因此, 在模型求解时, 可进一步简化功率传播方程<sup>[29]</sup>, 其表达式为

$$\Gamma_j = \int_0^{2\pi} \int_0^a i_j(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \quad (8)$$

$$\Gamma_k = \int_0^{2\pi} \int_0^a i_k(r, \varphi, z) r dr d\varphi, \quad (9)$$

光功率填充因子  $\Gamma_j$  和  $\Gamma_k$  在一定程度上反映了不同模式在光纤纤芯中的能量配比。对于光功率填充因子较大的模式, 有效放大面积越大, 模式增益越高, 这就形成了 DMG, 故选择合适的光纤结构及铒

离子掺杂分布来降低不同模式的功率填充因子差异成为重中之重。信号光不同模式的增益  $G$  是分析 FM-EDFA 的关键参数, 其单位为 dB, 表达式为

$$G_j = 10 \lg \frac{P_{out,j}}{P_{in,j}}, \quad (10)$$

式中:  $P_{out,j}$  为第  $j$  个信号模式的输出功率;  $P_{in,j}$  为第  $j$  个信号模式的输入功率。不同模式的输出功率可以通过功率传播方程求解得到。另外, 噪声系数是衡量 FM-EDFA 噪声大小的重要参数, 其表达式为

$$X_{NF,j} = 10 \lg \left( \frac{P_{in,j}}{P_{out,j}} + \frac{P_{ASE,j} P_{in,j}}{h\nu_s \Delta\nu P_{out,j}} \right). \quad (11)$$

### 3 光纤设计

环芯光纤结构如图 1(a) 所示。环芯光纤纤芯由两层折射率不同的区域组成, 其中心位置的折射率与包层相同, 材料均为纯二氧化硅, 纤芯边缘区域折射率较高, 其模场被限制在高折射率环形区域中, 进而实现模场调控。为将光纤模场更好地限制在纤芯区域中, 在纤芯外部设置折射率较低的沟槽。纤芯凹陷与高折射率环形区域的半径分别为  $a_1$  和  $a_3$ , 沟槽半径为  $d$ , 包层半径为  $R$ ,  $a_2$  为第一层铒离子掺杂边界到纤芯中心的距离。高折射环和沟槽相对包层的折射率差分别为  $\Delta n_1$  和  $\Delta n_2$ 。光纤参数设置为  $a_1 = 3.9 \mu\text{m}$ ,  $a_2 = 5.2 \mu\text{m}$ ,  $a_3 = 8.2 \mu\text{m}$ ,  $d = 3.5 \mu\text{m}$ ,  $R = 62.5 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_1 = 0.009$ ,  $\Delta n_2 = 0.004$ 。在 FM-EDFA 中, 由于  $LP_{01}$  模和  $LP_{02}$  模的光场分布相差较大, 故增益差较大, 进而不易调控。传统阶跃光纤无法避免  $LP_{02}$  模的激发, 但所提环芯光纤可



可以有效避免  $LP_{02}$  模的激发,支持 4 模式组( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{31}$ )同时传输。信号 4 模式组光强沿光纤截面的二维模场分布如图 1(b)所示。可以看出,与传统阶跃光纤不同,信号光 4 种模式分布于光纤的环芯中,在纤芯最中间处光强为 0,且模场分布

可以被调控。光纤中铒离子分两层掺杂,掺杂浓度(体积分数,下同)分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。通过优化两层掺杂的比例,即  $N_1$  为  $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,  $N_2$  为  $8.6584 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ,可以进一步降低不同模式功率填充因子的数值差异,进而实现模式增益的均衡。

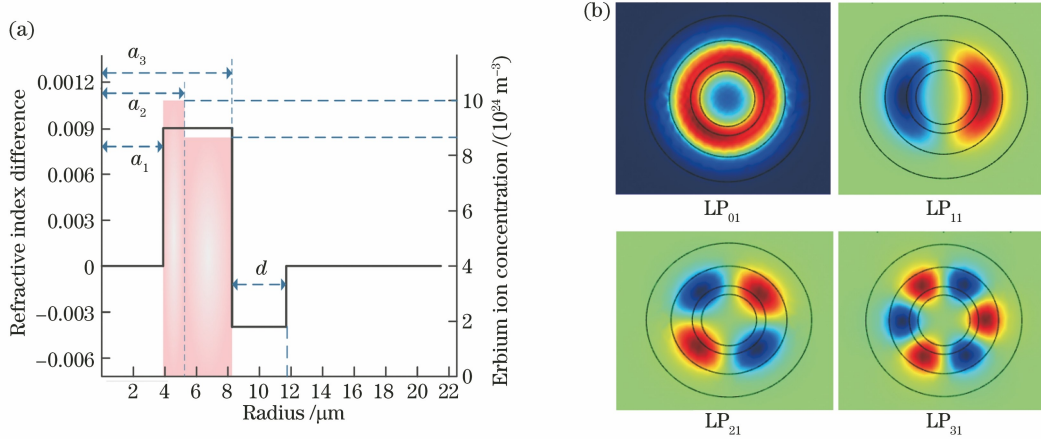


图 1 环芯光纤的折射率分布、铒离子掺杂分布以及模场分布。(a) 环芯光纤的折射率分布及铒离子掺杂分布;(b) 模场分布

Fig. 1 Refractive index distribution, erbium ion doping distribution, and mode field distribution in ring core fiber.

(a) Refractive index distribution and erbium ion doping distribution in ring core fiber; (b) mode field distribution

### 4 仿真结果分析

将设计的铒离子分层掺杂环芯光纤作为增益光纤,对模式增益性能进行研究。每个信号模式输入功率为  $-10 \text{ dBm}$ , 光纤长度为  $6 \text{ m}$ , 泵浦功率为  $3 \text{ W}$ 。基于上述条件,仿真分析了各参数对 FM-EDFA 性能的影响。

对分层掺杂与未分层掺杂结构对 DMG 的影响进行了研究。图 2 所示为不同掺杂层数下 DMG 随  $a_1$  的变化曲线。可以看出,在  $1550 \text{ nm}$  波长信号处,随着  $a_1$  的增加, $LP_{11}$  模与  $LP_{01}$  模的增益差略有增加, $LP_{21}$  模与  $LP_{01}$  模的增益差和  $LP_{31}$  模与  $LP_{01}$  模的增益差在不断增加,这表明掺铒光纤的环芯厚度可直接影响 DMG 值。因此,在保证 4 模传输的基础上,应尽可能地增大环芯的厚度。当环芯光纤中采用均匀掺杂结构时,FM-EDFA 各模式的增益差始终大于分层掺杂的情况。当  $a_1 = 3.9 \mu\text{m}$  时,FM-EDFA 的最大 DMG 从  $0.8 \text{ dB}$ (均匀掺杂)降至  $0.44 \text{ dB}$ (分层掺杂)。随着环芯厚度的降低,均匀掺杂与分层掺杂间各模式差的差距逐渐减小。仿真结果表明,在环芯光纤中采用分层掺杂结构能够有效地降低 FM-EDFA 的 DMG。

沟槽相对包层的折射率差和沟槽宽度的变化对 FM-EDFA 的 DMG 影响较大。图 3 给出了  $1550 \text{ nm}$  信号波长处 FM-EDFA 4 模式组 DMG 随

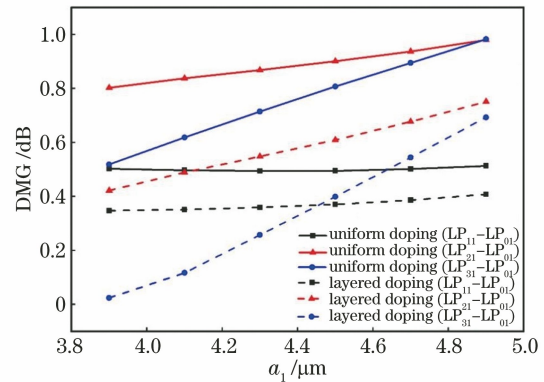


图 2 环芯光纤的 DMG 随  $a_1$  的变化

Fig. 2 DMG of ring core fiber varying with  $a_1$

$\Delta n_2$  和  $d$  的变化曲线。根据仿真结果可以得出,当光纤无沟槽时,FM-EDFA 的 DMG 取决于  $LP_{11}$  模和  $LP_{31}$  模的增益差,其值为  $1.41 \text{ dB}$ 。与图 3 对比可以看出,通过引入沟槽,4 模式组的 DMG 明显降低。当  $\Delta n_2$  小于  $0.004$  时,FM-EDFA 的 DMG 随着沟槽宽度  $d$  的增加在不断降低。然而,当  $\Delta n_2$  增加至  $0.004$ ,沟槽宽度  $d$  增加至  $3.5 \mu\text{m}$  时,DMG 降低到最小值  $0.43 \text{ dB}$ 。当  $\Delta n_2$  继续增加至  $0.005$  和  $0.006$  时,FM-EDFA 的 DMG 分别在  $d = 2 \mu\text{m}$  和  $d = 1.5 \mu\text{m}$  处降至最小值  $0.46 \text{ dB}$  和  $0.48 \text{ dB}$ ,然后 DMG 随着沟槽宽度  $d$  明显增加。在优化的光纤结构参数如沟槽相对包层折射率差为  $\Delta n_2 = 0.004$ ,沟槽宽度为  $d = 3.5 \mu\text{m}$  的基础上研究了

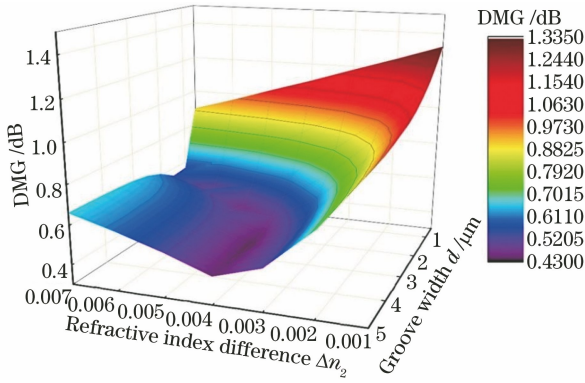


图 3 FM-EDFA 的 DMG 随  $\Delta n_2$  和  $d$  的变化

Fig. 3 DMG of FM-EDFA varying with  $\Delta n_2$  and  $d$

FM-EDFA 4 模式组的增益和 DMG 随泵浦功率的变化,如图 4 所示。仿真结果表明,当泵浦功率小于 3 W 时,1550 nm 信号波长每模式的增益随着泵浦功率增加在迅速增加。当泵浦功率为 3 W 时,4 模式组平均增益达到 23.5 dB,DMG 约为 0.43 dB。当泵浦功率大于 3 W 时,每模式增益逐渐增加并趋于饱和。同时,FM-EDFA 的 DMG 随着泵浦功率变化逐渐增加并趋于稳定,但始终低于 0.51 dB,这

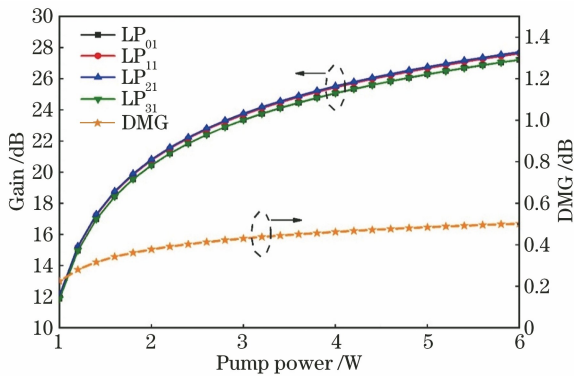


图 4 FM-EDFA 的增益和 DMG 随泵浦功率的变化

Fig. 4 Gain and DMG of FM-EDFA varying with pump power

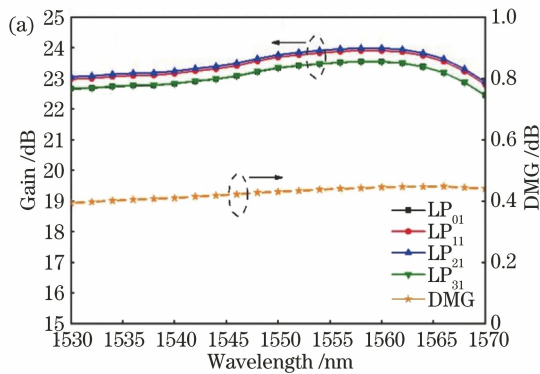


图 6 FM-EDFA 的 4 模式组光谱。(a)增益和 DMG;(b)噪声系数

Fig. 6 Spectra of 4-mode group of FM-EDFA. (a) Gain and DMG; (b) noise figure

表明泵浦功率的波动对 DMG 的影响较小。

光纤长度对 FM-EDFA 中波长为 1550 nm 信号的不同模式的影响如图 5 所示。在仿真中设置泵浦功率为 3 W。可以看出,FM-EDFA 每模式的增益随着光纤长度的增加在不断增加。当光纤长度达到 6 m 时,4 模式组平均增益达到 23.5 dB。当光纤长度大于 6 m 时,模式增益逐渐趋于饱和。在光纤长度变化过程中,LP<sub>21</sub> 具有最大的模式增益,LP<sub>31</sub> 具有最小的模式增益。4 模式组最大 DMG 主要由 LP<sub>21</sub> 和 LP<sub>31</sub> 模的增益决定,并且随着光纤长度的增加,其值始终低于 0.55 dB。

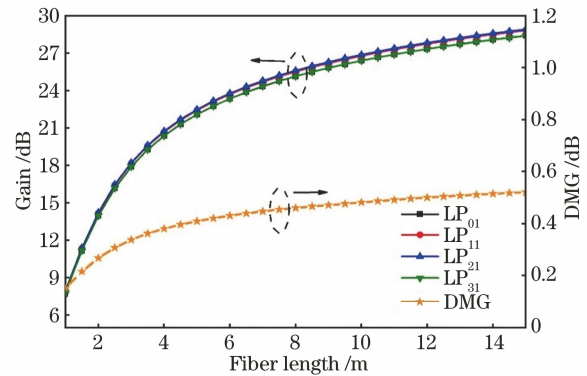


图 5 FM-EDFA 的增益和 DMG 随光纤长度的变化

Fig. 5 Gain and DMG of FM-EDFA varying with fiber length

图 6 给出了当信号每模式输入功率为 -10 dBm 时,FM-EDFA 的光谱响应。泵浦功率设置为 3 W,光纤长度设置为 6 m,较短的光纤能够有效地抑制模式损耗和光纤非线性效应的产生。从图 6(a)中可以看出,在 1530~1565 nm 波长范围内,LP<sub>21</sub> 模具有最大模式增益,LP<sub>31</sub> 模具有最小的模式增益,信号 4 模式组增益超过 22 dB,不同模式增益平坦度均低于 1 dB。同时,随着信号波长的增加,DMG 先增大后减小并始终低于 0.45 dB。从

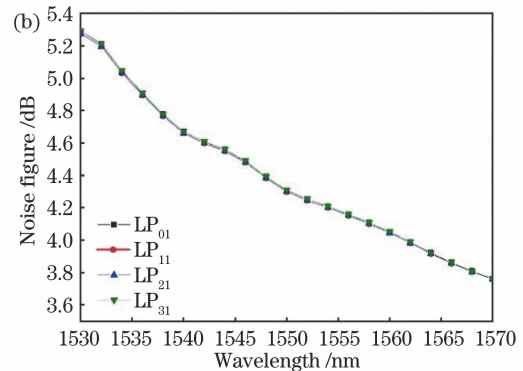


图 6(b)中可以看出,4 模式组信号的噪声系数在 1530~1565 nm 范围内均低于 5.3 dB,且不同模式的噪声系数存在微小差异,其原因是同一波长不同模式下产生的前向 ASE 噪声场分布与信号光相同,因而 FM-EDFA 不同模式的前向 ASE 噪声功率具有微小差异。此外,所提 FM-EDFA 具有低 DMG 特性,根据(11)式可知其不同模式的噪声系数近似相等。研究表明,在全 C 波段中,FM-EDFA 具有大于 20 dB 的增益以及较低的 DMG 和噪声系数。

表 1 为所提 FM-EDFA 与其他 FM-EDFA 的

表 1 所提 FM-EDFA 与其他 FM-EDFA 的性能对比

Table 1 Performance comparison of proposed FM-EDFA and other FM-EDFAs

Fiber	Scheme	Signal mode	DMG /dB	FM-EDFA
Step fiber	Core pumping (high-order mode)	$LP_{01}, LP_{11}$	1.20	Ref. [21]
Step fiber	Layered doping & core pumping	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$	0.50	Ref. [18]
Step fiber	Layered doping & cladding pump	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$	0.60	Ref. [23]
Step fiber	Layered doping & core pumping	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$	2.50	Ref. [17]
Ring core fiber	Core pumping	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{31}, LP_{41}$	0.60	Ref. [22]
Ring core fiber	Layered doping & cladding pump	$LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{31}$	0.45	Proposed

## 5 制造容差讨论

对 FM-EDFA 4 模式组的放大及增益均衡性能进行了研究。理论研究结果表明,采用铒离子分层掺杂环芯光纤可以实现低 DMG。然而,光纤制造工艺的精度会影响 FM-EDFA 的放大性能及均衡效果,故在上述理论研究的基础上,对环芯光纤在制造过程中出现的缺陷对 FM-EDFA 性能的影响进行了深入研究。

首先,通过仿真分析了铒离子掺杂浓度偏差对 FM-EDFA 均衡效果的影响,如图 7 所示。可以看出,当第一层铒离子浓度  $N_1$  和第二层铒离子浓度  $N_2$  的掺杂浓度偏差同时在  $-10\% \sim 10\%$  的范围内变化时,FM-EDFA 的 DMG 均低于 0.85 dB,这表明其均衡性能较稳定。当  $N_1$  和  $N_2$  同增同降时,可得到最小 DMG。当  $N_1$  和  $N_2$  反向变化时,DMG 逐渐增大。在图 7 的左上区域和右下区域,FM-EDFA 的性能有所下降。由于本文设置的铒离子浓度能够保证良好的均衡特性,故制造过程中带来的铒离子掺杂浓度偏差对 FM-EDFA 性能的影响较小。

另外,结构参数制造偏差对 DMG 的影响具有鲜明的分区特性,如图 8 所示。当  $a_2$  偏移量确定时, $a_1$  在  $-10\% \sim 10\%$  范围内的变化会引起 DMG

性能对比。可以看出,通过采用高阶模泵浦或者优化掺铒光纤结构均可以降低 FM-EDFA 的 DMG。同时,随着模式数的不断扩展,纤芯泵浦无法满足泵浦功率要求,且空间光路具有系统不稳定性,因此包层泵浦将在未来多模式传输系统中发挥巨大作用。通过对比发现,所提包层泵浦 FM-EDFA 具有较低的 DMG,故可认为其可实现较好的增益均衡效果,并且更加适用于未来长距离的 MDM 通信系统,可以有效降低系统的复杂度,进而提高系统的稳定性。

的明显变化,即  $a_1$  的偏移量在  $0\%$  左右时,DMG 最小,随着  $a_1$  正向增加至  $10\%$  或反向降低至  $-10\%$  时,DMG 逐渐增大。当  $a_1$  偏移量确定且  $a_2$  在  $-10\% \sim 10\%$  范围内变化时,DMG 变化较小,这表明在制造过程中应该更加精细地控制  $a_1$  的制造偏差。当  $a_1$  和  $a_2$  在  $-10\% \sim 10\%$  范围内同时变化,DMG 从 0.42 dB 增加至 0.84 dB 时,结构参数的制造偏差对均衡效果影响较小。仿真结果表明,所提 FM-EDFA 具有稳定的放大均衡效果。

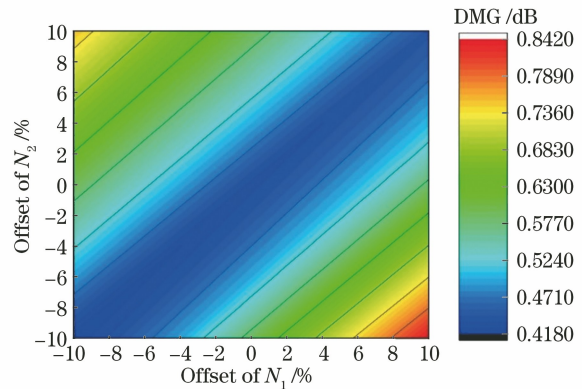
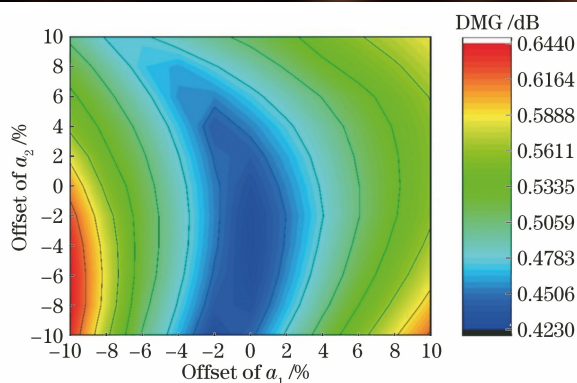


图 7 DMG 随  $N_1$  和  $N_2$  偏移量的变化

Fig. 7 DMG varying with offsets of  $N_1$  and  $N_2$

为了更加真实地模拟实际加工过程,采用 Monte Carlo 方法对 FM-EDFA 的性能进行了进一步分析。设置铒离子浓度  $N_1$  和  $N_2$ 、结构参数  $a_1$



图 8 DMG 随  $a_1$  和  $a_2$  偏移量的变化Fig. 8 DMG varying with offsets of  $a_1$  and  $a_2$ 

和  $a_2$  的变化范围均为  $-10\% \sim 10\%$ 。经大量样本模拟后,研究了 FM-EDFA 的 DMG 分布特性,结果如图 9 所示。可以发现,当光纤参数设置不合理,使得 FM-EDFA 性能严重恶化时,FM-EDFA 的 DMG 低于 1 dB 的概率能够达到 90.65%,表明所提 FM-EDFA 结构在实现低 DMG 方面具有较好的鲁棒性。

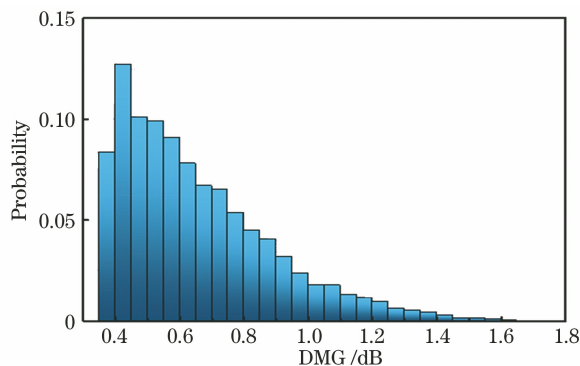


图 9 DMG 的分布特性

Fig. 9 Distribution characteristic of DMG

## 6 结 论

系统研究了基于铟离子分层掺杂环芯光纤的包层泵浦 FM-EDFA。通过采用包层泵浦和铟离子环芯双层掺杂的方式,实现了支持 4 模式组 ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{31}$ ) FM-EDFA 中 4 模式的同时放大和模间增益均衡。数值计算结果表明,当 FM-EDFA 中铟离子分双层掺杂且引入一个  $3.5 \mu\text{m}$  的单沟槽时,4 模式组的最大 DMG 为 0.43 dB。此外,所提 FM-EDFA 在全 C 波段 ( $1530 \sim 1565 \text{ nm}$ ) 具有超过 22 dB 的模式增益,小于 0.45 dB 的 DMG 以及低于 5.3 dB 的噪声系数。同时,全 C 波段的增益平坦度低于 1 dB。最后,分析了 DMG 对光纤制造偏差的容忍度,结果表明所提 FM-EDFA 具有较

好的稳定性。此外,基于包层泵浦结构的 FM-EDFA 有效降低了系统的成本和复杂度,更加适用于长距离 MDM 通信。

## 参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Foschini G, Winzer P, et al. Capacity limits of fiber-optic communication systems [C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication, March 22-26, 2009, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-37.
- [2] Essiambre R J, Mecozzi A. Capacity limits in single-mode fiber and scaling for spatial multiplexing[C]//OFC/NFOEC, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 12760867.
- [3] Alam S U, Jung Y M, Kang Q Y, et al. Recent progress in the development of few mode fiber amplifiers[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: Tu3C.1.
- [4] Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.  
裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001.
- [5] Hayashi T, Tamura Y, Hasegawa T, et al. 125- $\mu\text{m}$ -cladding coupled multi-core fiber with ultra-low loss of 0.158 dB/km and record-low spatial mode dispersion of  $6.1 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$  [C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: Th5A.1.
- [6] Ferreira F M, Fonseca D, da Silva H J A. Design of few-mode fibers with  $M$ -modes and low differential mode delay[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 353-360.
- [7] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Design of steering wheel-type ring depressed-core 10-mode fiber with fully improved mode spacing[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15067-15077.
- [8] Sakamoto T, Matsui T, Saitoh K, et al. Low-loss and low-DMD few-mode multi-core fiber with highest core multiplicity factor [C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington, D.C.: OSA, 2016: Th5A.2.
- [9] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Low-DMD and low-crosstalk few-mode multi-core fiber with air-

- trench/holes assisted graded-index profile[J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126155.
- [10] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 217-223.  
刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 217-223.
- [11] Wada M, Sakamoto T, Yamamoto T, et al. Cladding pumped randomly coupled 12-core erbium-doped fiber amplifier with low mode-dependent gain [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1220-1225.
- [12] Ma L, Tsujikawa K, Hanzawa N, et al. Design and fabrication of low loss hole-assisted few-mode fibers with consideration of surface imperfection of air holes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(22): 5164-5169.
- [13] Kasahara M, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [14] Sillard P, Bigot-Astruc M, Boivin D, et al. Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions [C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva. Washington, D. C.: OSA, 2011: Tu.5.LcCervin.7.
- [15] Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, et al. Low-DMGD 6-LP-mode fiber [C]//OFC 2014, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: M3F.2.
- [16] Ip E, Bai N, Huang Y K, et al. 88×3×112-Gb/s WDM transmission over 50 km of three-mode fiber with inline few mode fiber amplifier [C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva. Washington, D. C.: OSA, 2011: Th.13.C.2.
- [17] Zhang Z Z, Guo C, Cui L, et al. All-fiber few-mode erbium-doped fiber amplifier supporting six spatial modes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(10): 100604.
- [18] Zhao Q H, Zhang Z Z, Zhao N B, et al. Optimizing the erbium doped profile to equalize the modal gain in few mode erbium doped fiber amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030602.  
赵清华, 张振振, 赵宁波, 等. 优化光纤铒离子分布实现少模掺铒光纤放大器模式增益均衡[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030602.
- [19] Yung Y, Alam S, Li Z, et al. First demonstration of multimode amplifier for spatial division multiplexed transmission systems [C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva. Washington, D. C.: OSA, 2011: Th.13.K.4.
- [20] Bai N, Ip E, Wang T, et al. Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16601-16611.
- [21] Bai N, Ip E, Luo Y H, et al. Experimental study on multimode fiber amplifier using modal reconfigurable pump [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, California. Washington, D. C.: OSA, 2012: OW1D.3.
- [22] Gaur A, Rastogi V. Modal gain equalization of 18 modes using a single-trench ring-core EDFA [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(9): 2211-2216.
- [23] Kang Q Y, Lim E L, Jung F P, et al. Minimizing differential modal gain in cladding-pumped EDFAs supporting four and six mode groups [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21499-21507.
- [24] Wang W S, Ning T G, Pei L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0906001.  
王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0906001.
- [25] Lim E L, Jung Y, Kang Q, et al. First demonstration of cladding pumped few-moded EDFA for mode division multiplexed transmission [C]//OFC 2014, March 9-13, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: M2J.2.
- [26] Jung Y, Lim E L, Kang Q, et al. Cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 29008-29013.
- [27] Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(2): 271-283.
- [28] Zhang Z Z, Zhao Q H, Zhao N B, et al. Bi-directionally-pumped few-mode EDFA [C]//Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai. Washington, D. C.: OSA, 2014: ATh3A.
- [29] Gong M L, Yuan Y Y, Li C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3236-3246.